第40卷 第1期 2023年1月
干 旱 区 研 究 ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 1 Jan. 2023

沙地潜水含水层不同时间段抽水降深的差异性分析

周生辉[1]， 刘廷玺[1,2,3]， 段利民[1,2,3]， 冀 如[1]， 刘小勇[4]

（1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018；3. 黄河流域内蒙段水资源与水环境综合治理协同创新中心，内蒙古 呼和浩特 010018；4. 乌兰察布市水文勘测局，内蒙古 乌兰察布 012000）

摘 要：抽水降深过程是计算区域水文地质参数的重要观测资料，为揭示毛乌素沙地海流兔河流域第四系潜水含水层不同时段的水文地质特征，明晰沙地潜水含水层降深差异的主控因子，本文对同一口井不同时间的4次抽水降深差异进行了系统分析。在基于抽水井附近的逐小时监测水位，首次将Bland-Altman法引入了对抽水降深过程间的差异性辨析，并利用配线法和水位恢复法求解了第四系含水层的水文地质参数来进行差异性佐证。最后，本文以流域尺度为研究系统，通过对含水层厚度、水力坡度、地下水储量变化和降水补给分析，辨析了抽水降深差异产生的主要原因。研究结果得到毛乌素沙地海流兔河流域第四系潜水含水层导水系数变化范围为3.00~4.85 $m^2 \cdot h^{-1}$，且抽水前降水对包气带的下渗补给是产生抽水降深差异的主控因素。

关键词：抽水降深；差异性；潜水含水层；水文地质参数

获取区域水文地质参数最直接有效的方法通常采用抽水试验，利用抽水降深曲线计算相关的水文地质参数[1]。由于主要求解的渗透系数取决于岩土介质和流动液体的性质，对于自然界的地下水来说，通常状态下区域的渗透系数可近似看作岩层的透水性常数，基本不会发生较大差异，因此可以通过有限时间内的单井抽水过程曲线测算，近似代表区域的含水层性质[2]。但对于毛乌素沙地水循环交互最为剧烈的潜水含水层而言[3]，即使是区域地下水位变幅微弱的情况下，不同时间段的定流量抽水降深曲线也存在差异，而这种差异性又影响着我们对沙地水文地质的定性研究和区域生态水资源的定量评价，所以对沙地潜水含水层不同时间段抽水降深的差异性分析具有现实意义。

抽水过程的水位降深曲线是原位测定和分析含水层水文地质参数的重要动态资料[4]。Li等[5]基于原位抽水和模拟试验对开始抽水到水位恢复的全过程降深变化曲线进行了研究，分析了抽水持续时间对水文地质参数求解的影响；赵全升等[6]以潜水非完整井稳定流抽水试验的两个落程及水位恢复数据进行计算，确定出了辽河三角洲滨海湿地潜水含水层的水文地质参数；梁冰等[7]通过抽水、水位恢复和注水的水位降深过程求解了垃圾填埋场的水土特性；Pozdniakov等[8]利用供水井定期抽水所产生的水位周期波动解析了区域含水层的渗透系数。然而，以上研究多基于对有限时间内抽水降深的数据进行测算，而对于需长期观测的变动含水层，则缺乏多时段抽水降深变化差异的关注；同时，多数研究对于潜水含水层的抽水降深及水文参数还未作过多时段的详细讨论。为研究潜水含水层水文地质参数的时空差异性问题，本文对沙地潜水含水层不同时间段的多次抽水降深进行了对比分析，并详细讨论了相关的影响因素。

本文利用海流兔河流域塔来乌苏嘎查农用灌溉井附近的每小时监测记录水位，来分析抽水降深在不同时段的差异性问题，并扩充至整体的流域潜水含水层为研究单元。通过流域上其他井位的监测数据，对相同初始水位下不同时间段的定流量抽

收稿日期：2022-02-16； **修订日期：**2022-07-06
基金项目：国家重点研发计划（2018YFC0406400）；内蒙古自治区科技重大专项（2019ZD0009）；教育部创新团队发展计划（IRT-17R60）；科技部重点领域科技创新团队（2015RA4013）；内蒙古自治区草原英才产业创新创业人才团队
作者简介：周生辉（1996-），男，硕士研究生，主要从事水文地质及水文循环方面的研究. E-mail: 3035452884@qq.com
通讯作者：刘廷玺. E-mail: txliu1966@163.com

水降深及水位恢复过程进行了研究,揭示了毛乌素沙地流域第四系潜水含水层的时间差异性特征。

1 研究区概况和试验设计

1.1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地中部的海流兔河流域,流域内广布的风积沙和湖积沙,有利于大气降水对地下水的入渗补给,大大降低了干旱气候条件下的蒸发消耗,因而富集形成了巨厚的潜水含水层系统,是流域生产生活的主要水源[9]。流域整体处于鄂尔多斯盆地的伊陕斜坡之上,地形相对平缓,流域内无较大的构造断裂带,地质结构简单,潜水位埋深为0~50 m[10]。流域内的海流兔河基本受地下水排泄补给,由北向南汇入无定河,与流域潜水含水层的整体地下水流向相同(图1)。

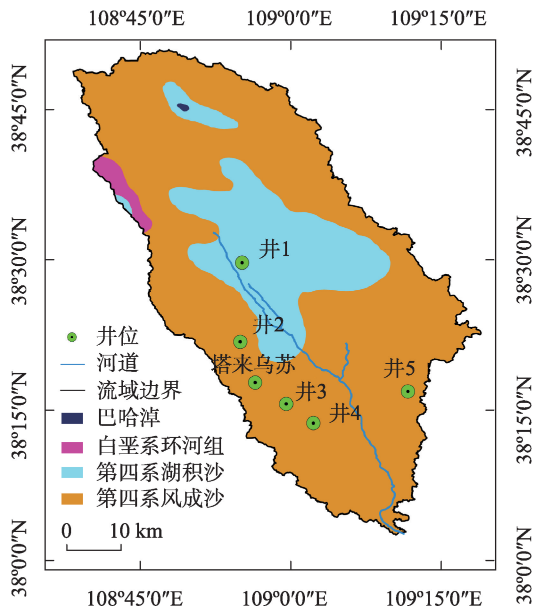


图1 海流兔河流域地理位置及上覆地质背景

Fig. 1 Location and geological background of the Hailiutu River Basin

1.2 抽水试验设计

试验点布置在海流兔河流域的塔来乌苏嘎查(38°17′43.26″N,108°56′37.74″E),区域地势平缓,为典型的沙地地貌(图1),周边无较大的取水井。钻孔资料揭示的地层结构与抽水井、观测井位置如图2所示。抽水选用灌溉井进行,管井贯穿整个第四系含水层,孔径357 mm,材质为水泥套管,管壁及管底进水,井深57 m,水泵放置在地下21~24 m处;观测井孔径为150 mm,井深15 m,距抽水井6.2 m,内置美国Onset公司生产的自动监测水位计,观测记录频率为1 h。文中的降雨气象资料来源于中国气象数据网。

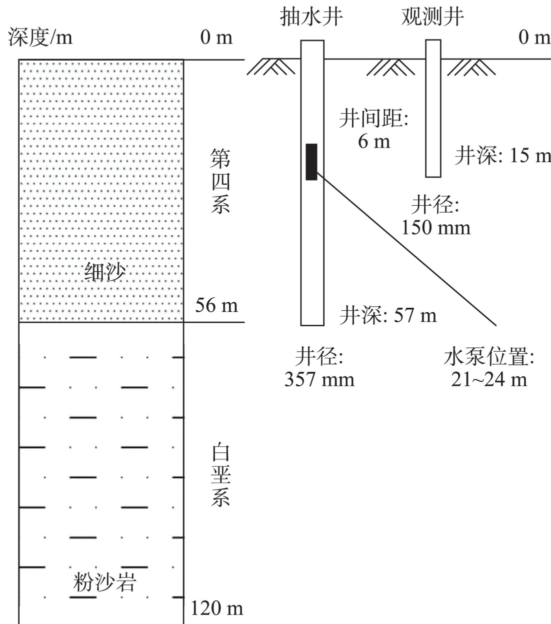


图2 钻孔地层柱状图与井结构

Fig. 2 Borehole formation column chart and well structure

抽水试验采用定流量抽水,抽水流量为32 $m^3 \cdot h^{-1}$,抽水管道压强为2.4 Mpa,非抽水期观测孔的水位基本稳定在埋深约2.14 m,共选取了4个时间段观测井记录的抽水与水位恢复数据(图3)。4个抽水试验全程的时间段分别为:(1) 2019年7月13日18:00至7月16日16:00(水位恢复约为24 h);(2) 2019年8月9日19:00至8月15日15:00(水位恢复约为23 h);(3) 2019年8月29日8:00至9月1日12:00(水位恢复约为16 h);(4) 2019年9月22日11:00至9月27日13:00(水位恢复约为18 h)。

2 差异性分析

从塔来乌苏观测井水位的变化可以发现(图3),历次抽水结束后水位都恢复到了原有水平,因此抽水井周围的潜水流初始厚度可视为定值;同时,相对于抽水试验的流速变化,自然状态下平缓地区的地下水运动速率很小,而抽水导致的含水层释水量变化远大于天然水力坡度的影响,一般可以将抽水试验的初始环境看作稳定态处理[2]。综上所

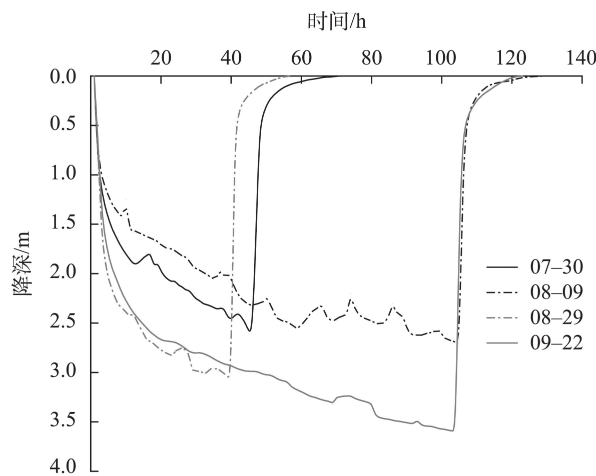


图3 观测井水位变化过程

Fig. 3 Observed well water level change process

述,该井多次的定流量抽水所造成的地下水位下降及停泵后的水位回升过程类似;同理,根据地下水位变化过程线求得的水文地质参数也相同。但是,该观测井所记录的多次抽水降深却存在一定的差异,似稳态的最大降深仅在不同时间段存在一致性。因此,为系统全面地对比其差异性,探究造成这种差异的主要原因,本文较均匀地选取了4次不同时间段的抽水过程,引入Bland-Altman法从绝对偏移的角度讨论了抽水全过程的差异性[11],并基于传统抽水试验的配线法和水位恢复法对该区域的导水系数进行求解[12–13]。抽水过程分析所引入的Bland-Altman法可以定量评价两组测量数据的一致性,主要是通过计算两组数据对应阶段的差值和均值统计学关系,来分析两组数据的过程性差异。

2.1 降水阶段差异性分析

分析对比4次抽水的水位下降过程可以看出,7月13日与8月9日的观测井水位下降过程曲线具有相似性,而8月29日与9月22日的下降过程也具有拟合度更高的相似性。根据Bland-Altman法对两两降深过程的分析得出,7月13日与8月9日抽水降深过程的95%一致性界限为(0.104,0.453),其中的标准差为0.089;8月29日与9月22日的95%一致性界限为(−0.014,0.254),标准差为0.068;7月13日与8月29日的95%一致性界限为(0.254,1.009),标准差为0.19;8月9日与9月22日的95%一致性界限为(0.460,1.189),标准差为0.18。根据标准差越小而过程曲线的一致性越强这一特性可以发现,前两次和后两次的抽水水位下降过程具有一致性,而前两次和后两次这两组之间存在差异性。

为更加详细地讨论降深曲线差异对水文地质参数求解的影响,利用Boulton模型的配线法求解导水系数。该配线过程采用的是加拿大滑铁卢水文地质公司开发的Aquifer Test软件对水位降深值进行Boulton模型配线拟合,参数在系统自动拟合的基础上,通过手动调试到最佳拟合效果得到水文地质参数[14]。从计算得出结果可以看出(表1),4次抽水配线法估算的导水系数平均值为4.38 $m^2\cdot h^{-1}$,极差为0.85,给水度平均值为0.11,极差为0.13,参数的差异度与降深曲线所反映的规律一致,计算结果与流域其他研究者得到参数范围一致[15–16]。

2.2 回水阶段差异性分析

相较于人为的抽水降深求解参数,利用水位恢复数据更能体现自然状态下的地下水流运动状态[17]。根据4次抽水后的水位恢复过程可以发现,7月13日与8月9日的观测井水位恢复到初始状态的时间较长,且两者的水位恢复过程曲线具有相似性;8月29日与9月22日的恢复时间相对于前两次较短,恢复过程也类似。根据Bland-Altman法对两两水位恢复末端的过程分析表明:7月13日与8月9日回水过程的95%一致性界限为(−0.214,0.165),其中的标准差为0.097;8月29日与9月22日的95%一致性界限为(−0.108,0.117),标准差为0.057;7月13日与8月29日的95%一致性界限为(−0.175,0.385),标准差为0.143;8月9日与9月22日的95%一致性界限为(−0.405,0.784),标准差为0.303。从标准差反映得到,前两次和后两次的水位恢复过程具有很强的一致性,而前后两组间的差异性很大,这与降水阶段差异性的结论相同。

表1 配线法求参结果

Tab. 1 Results of parameters of water level recovery method

开始抽水时间	7月13日	8月9日	8月29日	9月22日	均值
配线法导水系数/($m^2\cdot h^{-1}$)	4.66	4.85	4.02	4.00	4.38
配线法给水度	0.13	0.19	0.06	0.07	0.11

恢复水位法是根据抽水井或观测井的水位恢复资料确定含水层的导水系数，该方法是对停泵后水位恢复过程类似于直线段的部分求斜率[18]。利用4次抽水后的水位恢复数据，根据Neuman模型的恢复水位法得到的导水系数平均值为3.38 $m^2 \cdot h^{-1}$，极差为0.81（表2），计算得到的参数差异性与回水曲线的Bland-Altman分析相同，基本和抽水配线法的变化差异一致。

3 讨 论

传统的抽水试验方法通常只能表示一个区域含水层参数的平均值，甚至在各向异性的非均质含水层中，只能代表抽水井实际影响范围内的水文地质特征[19]。在岩性单一，第四系细砂含水层抽水影响半径为50~100 m的海流兔河流域，导致塔来乌苏嘎查研究点抽水井初始水位相同时定流量抽水降深产生的差异，则可能与研究区的含水层厚度、区域水力坡度、尺度效应和抽水前的降水补给影响有关[20-21]；同时，距塔来乌苏嘎查抽水井5.5 km的井3，在同年7—9月统测显示出地下水埋深基本保持不变的现象，也表明研究点水文地质参数的各向同性范围可能更大，有必要扩充空间尺度至第四系沙地潜水含水层，对抽水过程的差异性进行分析。因此，本文以海流兔河流域整体含水层为研究范围，对降深差异的相关因素进行了系统分析，讨论了其抽水降深的差异性原因，并对主要影响因素进行了详细阐述。

3.1 流域地下水位变化对降深的影响

由于抽水井附近监测记录的潜水流初始厚度保持不变，在流域上建立与塔来乌苏嘎查研究点同纬度且沿河道对称的监测井5为空间对照组；同时，为研究上游水位变化对抽水井降深的影响，建立了自动监测井1（图1）。根据井1和井5逐小时监测记录的地下水位可知（图4），整个流域7—9月的地下水位变幅仅在0.5 m左右，相较于研究目标含水层50 m左右的厚度，该变化基本可以忽略[22-23]。井5记录的地下水位变幅显示，7月13日开始抽水的相对地下水位为0.96 m，8月9日为1.25 m，8月29日为1.19 m，9月22日为1.34 m。上游井1的记录数据显示，7月13日开始抽水的相对地下水位为1.46 m，8月9日为1.51 m，8月29日为1.37 m，9月22日为

表2 水位恢复法求参结果

Tab. 2 Results of parameters of water level recovery method

开始抽水时间	7月13日	8月9日	8月29日	9月22日	均值
恢复水位法导水系数/($m^2 \cdot h^{-1}$)	3.69	3.81	3.00	3.03	3.38

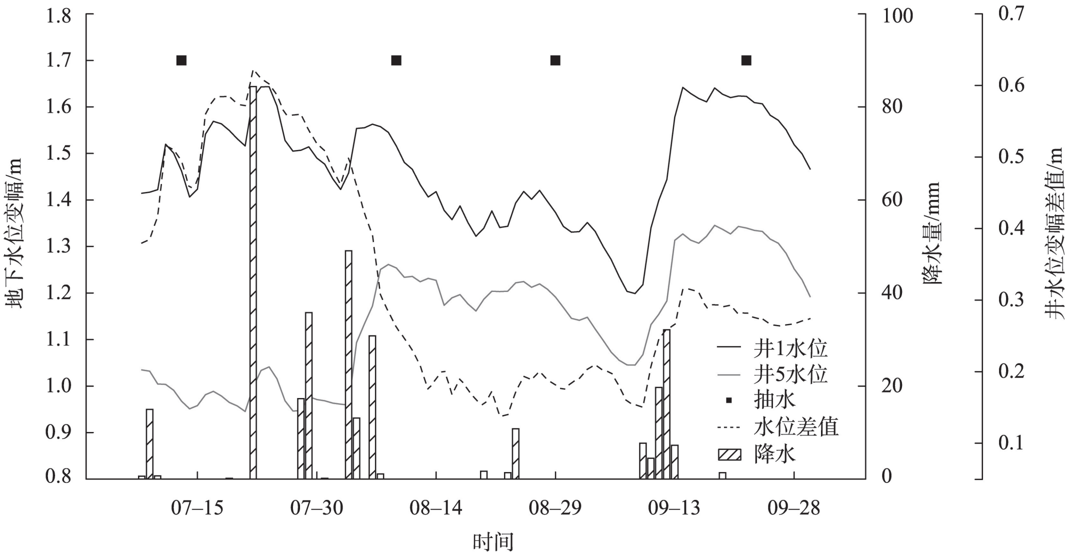


图4 地下水位变幅和差值及降水量变化

Fig. 4 Variation and difference of groundwater level and precipitation

1.62 m。通过两井的相对地下水位对比发现,流域整体地下水位所反映的潜水含水层厚度变化与之前的抽水过程及水文地质参数的差异性分析无明显的相关性,因此,可以判断流域整体潜水位变化不是影响抽水差异的直接因素,也说明更大尺度的含水层厚度变化对短期的抽水试验范围影响有限。

3.2 流域水力坡度对降深的影响

当水面坡度不大时,可以近似地将地下水面当作水平面来处理,但水力坡度所导致的地下水流对井的抽水过程仍存在一定范围的影响[24]。为从流域范围分析水力坡度的影响表征,对全流域进行3维水文地质建模后,通过同年非灌溉期统测的流域地下水位来分析水力坡度与抽水降深的联系。根据地下水等水位线可知,海流兔河流域的地下水主流方向基本与海流兔河干流流向一致,地形坡度和河道下切是水力梯度产生的主要因素。上游井1和下游井5的逐小时水位差值显示,7月13日开始抽水的地下水水位差为0.49 m,8月9日的水位差为0.26 m,8月29日的水位差为0.18 m,9月22日的水位差为0.28 m。由上下游的水位差变化说明,流域整体的水力坡度变化与抽水降深并无显著的相关性。同期,在7月26日和8月26日测量了抽水区域附近的井2和井4的地下水埋深(表3),发现7月26日和8月26日的两井水位埋深差值相等,这也说明抽水试验区域的水力坡度基本保持不变,抽水井附近区域的水力坡度并不是抽水降深差异的主控因素。综合流域和区域尺度的水位差变化可以看出,水力坡度所产生的地下水流速对抽水降深的影响可直接忽略。

3.3 流域地下水储水量变化对降深的影响

水位和水力坡度变化都是基于单点测量的数据分析,而对于整体的面状变化所产生的尺度效应[25-26]对潜水含水层水文地质参数求解的影响还缺乏研究。本文为分析大尺度数据对抽水降深的影响,采用GRACE重力卫星反演出的陆地水储量来分析大尺度的变化效应(数据来源于国家青藏高原科学数据中心)。陆地水储量主要由土壤水储量、地表水体储水量、叶冠层储水量、地下水水储量组成[27],而海流兔河流域地表植被稀疏,河网密度小,所以土壤水和地下水储量主要决定了陆地水储量的变化。受GRACE产品空间分辨率影响,选取覆盖研究区的网格数据(108°~109°E,37°~38°N,中心点为108°46′,38°27′),以2019年7—9月的陆地水储量变化平均值作为研究区的陆地水储量变化量,来分析地下水和土壤水储量变化对抽水降深的影响。通过表4的等效水高可以发现,陆地储水量变化一直在逐月上升,说明地下水和土壤水储量也处于上升状态,这与监测记录的流域地下水位上升及水力坡度减小过程相对应。根据前文的差异性分析,抽水降深过程导致的水文地质参数变化趋势整体上具有时间一致性,由此可知土壤含水量的变化可能对抽水降深存在主导作用,但由于数据时间尺度问题,流域地下水储水量变化对抽水降深的影响不甚显著[28]。

3.4 降水补给对降深的影响

降雨入渗补给是沙地潜水含水层的主要补给来源,由于包气带的制约,一般地下水补给总是滞后于降水事件[29-30]。监测井水位变化表明(图4),地下水位的上升与降水事件基本同时发生,而且两者间存在明显的滞后性响应,虽然塔来乌苏监测井的水位在降水补给下无明显变化,但区域降水必然补给了包气带,从而影响地下水位变化。根据流域附近的榆林站逐日降水显示,7月13日开始抽水的前3 d发生了有效连续降水,8月9日的前2 d有降水,8月29日的前5 d有降水,9月22日的前9 d存在连续有效降水。从图5可以发现,抽水开始前6 d的累计降雨量为:7月13日(94.1 mm)>8月9日(16.3 mm)>8月29日(12.2 mm)>9月22日(1.4 mm),其中8月9日抽水的前3 d累计降雨量远大于其他3次抽水,7月13日和8月9日的前4 d累计降雨量与其他2次抽水的累计降雨最小差值超过了10 mm,7月13日和8月29日前5 d累计降雨量相差5.5 mm。通过对

表3 地下水埋深及差值

Tab. 3 Groundwater burial depth and difference

	井2埋深/m	井3埋深/m	井4埋深/m	井2与井4的埋深差值
7月26日	1.44	3.17	1.84	0.12
8月26日	1.56	3.18	1.96	0.12

表4　海流兔河流域7—9月的陆地水储量变化值

Tab. 4　Variation values of terrestrial water reserves in the Hailiutu River Basin from July to September

	7月	8月	9月
等效水高/mm	-9.41	-8.72	-7.95

注:负值表示储量变化为减少状态。

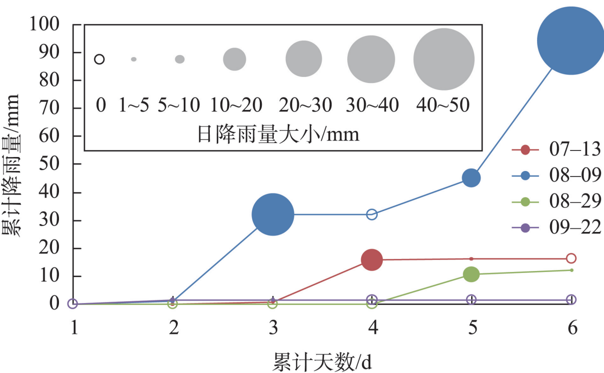


图5　累计降雨气泡图

Fig. 5　Cumulative rainfall bubble diagram

累计降水和水文地质参数的对比表明:(1) 有效连续降水距抽水开始的时间与降深曲线及求解的导水系数存在明显的相关性;(2) 有效降水发生距抽水时间越近,同时段的抽水降深也越小,导水系数也越大;(3) 距抽水开始的前5 d累计降水量对抽水降深的差异具有决定性影响。

结上所述,降水补给对降深的影响主要在于降水结束后,区域的降水入渗还在缓慢进行,部分降水量还赋存在包气带内,没有完全补给地下水。随后由于抽水导致的水位下降,包气带内的稳定持水性被破坏,大量富集在包气带内的水开始下渗补给饱和带,导致距降水发生结束越近,沙地包气带的水量损耗就越小,对潜水的补给强度也就越大,从而使抽水降深过程产生了明显的差异。

4　结　论

通过对海流兔河流域多个地下水监测数据的水位及水力坡度和卫星数据分析表明,潜水含水层在大尺度范围内的厚度、水动力和地下水储水量的变化,对松散第四系含水层的抽水降深基本没有影响,空间尺度效应对局地的抽水过程影响不大,赋存在沙地包气带的土壤水会导致水文地质参数的计算结果存在差异。主要研究结论如下:

(1) 通过引入Bland-Altman法对4次抽水降深过程曲线进行了差异性评估,对两两抽水降深过程的对比得出7月13日和8月9日为一组的降深一致性强,8月29日和9月22日为一组的降深一致性更强,而7月13日、8月9日和8月29日、9月22日这两组间存在明显的差异。利用两两抽水过程分析的均值相对误差,有效地定量判断同一含水层的抽水降深过程差异性,以此来调整抽水试验。

(2) 利用抽水井附近观测井记录的逐小时地下水位降深估算得到海流兔河流域及其周边第四系砂质含水层的导水系数变化范围为4.00~4.66 $m^2 \cdot h^{-1}$,给水度变化范围为0.07~0.13。受观测井类型及数据记录频率和潜水含水层恢复时间的影响,Neuman模型恢复水位法得到的导水系数变化范围为3.00~3.81 $m^2 \cdot h^{-1}$。

(3) 沙地降水对包气带的补给是潜水含水层抽水试验存在差异的主要因素,且在有效降水结束后的4 d仍存在影响。因此对于水循环密切的松散潜水含水层抽水试验,求解其水文地质参数时还要考虑降水对包气带含水量的垂向补给作用,抽水试验最好选取降水结束后的4~5 d进行。

参考文献(References):

[1] Bunn Melissa I, Rudolph David L, Endres Anthony L, et al. Field observation of the response to pumping and recovery in the water table region of an unconfined aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2011, 403(3–4): 307–320.

[2] 薛禹群, 吴吉春. 地下水动力学[M]. 第三版. 北京: 地质出版社, 2010. [Xue Yuqun, Wu Jichun. Groundwater Dynamics[M]. 3rd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2010.]

[3] Zhang Zaiyong, Wang Wenke, Gon Chengchen, et al. Effects of non-isothermal flow on groundwater recharge in a semi-arid region [J]. Hydrogeology Journal, 2021, 29(2): 541–549.

[4] Hammond Patrick A, Reliable yields of public water-supply wells in the fractured-rock aquifers of central Maryland, USA[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(1): 333–349.

[5] Li Peiyue, Qian Hui, Wu Jianhua, et al. Determining the optimal pumping duration of transient pumping tests for estimating hydraulic properties of leaky aquifers using global curve-fitting method: A simulation approach[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71 (1): 293–299.

[6] 赵全升, 胡舒娅, 王新民, 等. 辽河三角洲滨海湿地含水层水文地质参数获取的试验研究[J]. 地理科学, 2014, 34(12): 1533–1537. [Zhao Quansheng, Hu Shuya, Wang Xinmin, et al. Experimental study of aquifer hydrogeological parameter acquisition in coastal wetlands of Liaohe Delta[J]. Scientia Geographica Sinica,

2014, 34(12): 1533-1537.]

[7] 梁冰, 张柴, 刘磊, 等. 垃圾土现场渗透性测定与土水特性反演[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1493-1500, 1511. [Liang Bing, Zhang Chai, Liu Lei, et al. Field permeability measurement of waste and inversion of soil-water characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1493-1500, 1511.]

[8] Pozdniakov Sergey, Ivanov Pavel, Davis Paul, et al. Use of groundwater level fluctuations near an operating water supply well to estimate aquifer transmissivity[J]. Groundwater, 2021, 59(1): 49-58.

[9] Yang Zhi, Zhou Yangxiao, Wenninger Jochen, et al. Groundwater and surface-water interactions and impacts of human activities in the Hailiutu catchment, Northwest China[J]. Hydrogeology Journal, 2017, 25(5): 1341-1355.

[10] 周生辉, 刘廷玺, 段利民, 等. 毛乌素沙地海流兔河流域水文地质特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 103-110. [Zhou Shenghui, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. Hydrogeological characteristics of underwater aquifer in the Hailiutu River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(5): 103-110.]

[11] 李烨明, 谢代梁, 胡鹤鸣, 等. 基于超声波衰减效应的悬移质粒径分布反演[J]. 水力发电学报, 2020, 39(1): 21-30. [Li Yeming, Xie Dailiang, Hu Heming, et al. Inversion of particle size distributions of suspended loads based on ultrasonic attenuation effect[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(1): 21-30.]

[12] Hunt Bruce. Characteristics of unsteady flow to wells in unconfined and semi-confined aquifers[J]. Journal of Hydrology, 2006, 325(1-4): 154-163.

[13] Mishra P K, Neuman S P. Improved forward and inverse analyses of saturated-unsaturated flow toward a well in a compressible unconfined aquifer[J]. Water Resources Research, 2010, 46(7): 759-768.

[14] 陈晨, 文章, 梁杏, 等. 江汉平原典型含水层水文地质参数反演[J]. 地球科学, 2017, 42(5): 727-733. [Chen Chen, Wen Zhang, Liang Xing, et al. Estimation of hydrogeological parameters for representative aquifers in Jianghan Plain[J]. Earth Science, 2017, 42(5): 727-733.]

[15] 白乐, 李怀恩, 何宏谋, 等. 煤矿开采区地表水-地下水耦合模拟[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 931-937. [Bai Le, Li Huai'en, He Hongmou, et al. Integrated simulation of surface water and groundwater in a high intensive coal mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 931-937.]

[16] 钱程, 穆文平, 邢渊, 等. 某气田石油类污染物运移数值模拟研究[J]. 环境工程, 2016, 34(4): 68-72, 131. [Qian Cheng, Mu Wenping, Xing Yuan, et al. Numerical simulation of petroleum contaminant transport in a field[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(4): 68-72, 131.]

[17] Neville Christopher J, Kamp Garth van der. Using recovery data to extend the effective duration of pumping tests[J]. Groundwater, 2012, 50(5): 804-807.

[18] 范丹丹, 陈群, 亓立成, 等. 由抽水试验计算砂卵石含水层渗透系数的方法对比[J]. 水利水运工程学报, 2021, 43(4): 54-60. [Fan Dandan, Chen Qun, Qi Licheng, et al. Comparison of methods to calculate coefficient of permeability of sandy cobble aquifer based on pumping tests[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021, 43(4): 54-60.]

[19] 王军辉, 王峰. 论抽水的降落漏斗范围、影响半径与环境影响范围[J]. 水利学报, 2020, 51(7): 827-834. [Wang Junhui, Wang Feng. Discussion on the range of groundwater depression cone, radius of influence and scope of environmental impacts during pumping[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7): 827-834.]

[20] Tamayo-Mas Elena, Bianchi Marco, Mansour Majdi. Impact of model complexity and multi-scale data integration on the estimation of hydrogeological parameters in a dual-porosity aquifer[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(6): 1917-1933.

[21] Pozdniakov Sergey, Ivanov Pavel, Davis Paul, et al. Use of groundwater level fluctuations near an operating water supply well to estimate aquifer transmissivity[J]. Groundwater, 2021, 59(1): 49-58.

[22] 吴纲, 孙红月, 陈永珍, 等. 完整井定降深抽水非稳定流水位流量近似解[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 3095-3101. [Wu Gang, Sun Hongyue, Chen Yongzhen, et al. An approximate solution of unsteady flow under fixed-drop pumping[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 3095-3101.]

[23] Li Zhaofeng, Zhou Zhifang, Dai Yunfeng, et, al. Contaminant transport in a largely-deformed aquitard affected by delayed drainage [J]. Journal of Pollutant Hydrology, 2019, 221: 118-126.

[24] 夏文则, 刘宗彦, 付法凯, 等. 井抽水地下水直线运动规律探讨[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 138-140. [Xia Wenze, Liu Zongyan, Fu Fakai, et al. Study on the linear movement law of groundwater pumped from well[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(2): 138-140.]

[25] 孙蓉琳, 梁杏, 靳孟贵. 基于野外水力试验的玄武岩渗透性及尺度效应[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1490-1494. [Sun Ronglin, Liang Xing, Jin Menggui. Permeability of basalt and its scale effect based on field hydraulic tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1490-1494.]

[26] 蒋立群, 孙蓉琳, 王文梅, 等. 水力层析法与克立金法估算非均质含水层渗透系数场比较[J]. 地球科学, 2017, 42(2): 307-314. [Jiang Liqun, Sun Ronglin, Wang Wenmei, et al. Comparison of hydraulic tomography and kriging for estimating hydraulic conductivity of a heterogeneous aquifer[J]. Earth Science, 2017, 42(2): 307-314.]

[27] Henry Chris M, Allen Diana M, Huang Jianliang. Groundwater storage variability and annual recharge using well-hydrograph and GRACE satellite data[J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19(4): 741-755.

[28] Chen Kuan-Hung, Hwang Cheinway, Chang Liang-Cheng, et al. Infiltration coefficient, percolation rate and depth-dependent specif-

ic yields estimated from 1.5 years of absolute gravity observations near a recharge lake in Pingtung, Taiwan[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603(PartC): 127089.

[29] 杨文斌, 唐进年, 梁海荣, 等. 我国典型沙漠(地)流动风沙土的深层渗漏量及动态变化[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(9): 2052-2061. [Yang Wenbin, Tang Jinnian, Liang Hairong, et al. Deep soil water infiltration and its dynamic variation in the shifting sandy land of typical deserts in China[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2014, 44(9): 2052-2061.]

[30] Kambuku Dwight, Tsujimura Maki, Kagawa Shigeyoshi, et al. Corroborating stable isotopic data with pumping test data to investigate recharge and groundwater flow processes in a fractured rock aquifer, Rivirivi Catchment, Malawi[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(226). https://doi.org/10.1007/s12665-018-7403-9.

Analysis of differences in pumping depth in sand diving aquifers over different time periods

ZHOU Shenghui[1], LIU Tingxi[1,2,3], DUAN Limin[1,2,3], JI Ru[1], LIU Xiaoyong[4]

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 3. Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in the Inner Mongolia Reaches of the Yellow River, Hohhot 010018, Inner Mongolia China; 4. Ulanqab Hydrology Bureau, Ulanqab 012000, Inner Mongolia, China)

Abstract: We carried out long-term water level monitoring of a well in the quaternary sandy aquifer of Maowusu Sandy Land in China, selected four pumping processes of this well at different times in 1 year, analyzed the differences in the pumping and depth reduction processes, and systematically analyzed the possible factors of such differences. On the basis of multiple influencing factors, the main controlling factors of the differences in the depth of sandy diving aquifer were clarified, and the hydrogeological characteristics of the fourth-series diving aquifer in the Hailiutu River Basin at different times were effectively revealed. We introduced the Bland-Altman method to this study for the first time and used it to quantitatively analyze the difference between the pumping depth reduction processes. Moreover, we applied the traditional wiring method to solve hydrogeological parameters and the water level restoration method to solve the hydrogeological parameters of the quaternary aquifer for differentiation. Finally, this paper analyzed the main reasons for differences in the pumping depth by evaluating the aquifer thickness, hydraulic slope, groundwater reserves, and precipitation recharge at the watershed scale. Results showed that the variation range of water conductivity coefficient of the quaternary phreatic aquifer in Hailiutu River Basin of Mu Us Sandy Land is 3.00-4.85 $m^2 \cdot h^{-1}$ and the infiltration and replenishment of the vadose belt by precipitation before pumping is the main controlling factor for the differences in pumping depth.

Keywords: pumping depth; difference; phreatic aquifer; hydrogeological parameter